

dc\_197\_11

**FOTOAKUSZTIKUS ELVŰ, KÖRNYEZETVÉDELMI ÉS IPARI CÉLÚ  
GÁZKONCENTRÁCIÓ-MÉRŐ MŰSZEREK PONTOSSÁGÁT,  
MEGBÍZHATÓSÁGÁT NÖVELŐ MÉRÉSI ELRENDEZÉSEK ÉS  
ELJÁRÁSOK FEJLESZTÉSE**

MTA Doktori Értekezés Tézisei

**Dr. Bozóki Zoltán**  
tudományos főmunkatárs

MTA Lézerfizikai Kutatócsoport  
Szegedi Tudományegyetem  
Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék

Szeged  
2011

## **I. A KUTATÁSOK ELŐZMÉNYE**

A fotoakusztikus jelkeltés alapja, hogy ha egy anyagmintában, amely lehet gáznemű, folyékony vagy akár szilárd halmazállapotú is, időben változó mértékben fény nyelődik el, a mintában (illetve annak környezetében) akusztikus jel (hanghullám) keletkezik, melyet megfelelő érzékelőkkel detektálni lehet. A detektált jel nagysága arányos a fényelnyelődés mértékével és így a fényelnyelő anyag koncentrációjával. Megfelelő, jellemzően keskeny sáv szélességű, automatikus módon modulálható és folytonosan hangolható fényforrás alkalmazásával viszonylag egyszerű felépítésű és nagy megbízhatóságú fotoakusztikus rendszerek fejleszthetők, melyek segítségével bonyolult gázkeverékekben is lehetséges a mérendő komponens koncentrációjának szelektív mérése. A módszer további előnye a nagy pontosság, gyors válaszidő és széles mérési tartomány. A fotoakusztikus módszer több mint 120 éve ismert, és kb. 40 éve alkalmazzák gáz illetve aeroszol koncentráció mérésére. Ugyanakkor a fotoakusztikus koncentrációmérések pontosságának biztosításához elengedhetetlen a rendszerépítés során a rendszer elemeinek gondos optimalizálása, továbbá a rendszer működtetése során a rendszer működését befolyásoló kritikus paramétereket, mint pl. a lézer modulációs frekvenciája, illetve a lézer hullámhossza, folyamatosan az optimális értéken kell tartani.

A fotoakusztikus módszeren alapuló közel 20 éves kutatómunkám során kiemelt figyelmet fordítottam olyan mérési elrendezések és eljárások kidolgozására, melyek segítségével a fotoakusztikus mérések pontossága, megbízhatósága növelhető, és ezáltal a módszer alkalmas lesz nemcsak laboratóriumi, hanem terepi, ipari körülmények között is a megbízható működésre. Részt vettem a fotoakusztikus módszer számos tudományos és gyakorlati jelentőségű alkalmazásának kidolgozásában, mely alkalmazások során a fotoakusztikus rendszer az általam (illetve munkatársaim által) kidolgozott pontosság- és megbízhatóság-növelő eljárások révén vált képessé a kitűzött feladat megoldására.

## **II. CÉLKITŰZÉSEK**

Munkám általános célja a fotoakusztikus mérési módszer továbbfejlesztése, a gyakorlati alkalmazhatóságot elősegítő eljárások módszerek kidolgozása volt.

Ezen belül célul tűztam ki újfajta fotoakusztikus kamrák kifejlesztését, a meglévő kamrakonstrukciók továbbfejlesztését, melyek segítségével a fotoakusztikus rendszerek kedvező tulajdonságain lehet tovább javítani az alábbiak szerint.

- A korábban általunk használt longitudinális kamrakonstrukció továbbfejlesztése, a külső zajok által okozott túlvezérlések hatásának csökkentése, a kamra alkalmassá tétele folyamatos gázáramlás mellett történő mérésekre; továbbá a kamra továbbfejlesztése oly módon, hogy alkalmas legyen impulzusszerű koncentrációváltozások mérésére; illetve magas hőmérsékleten ( $>200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) történő üzemeltetésre.
- A fotoakusztikus kamra rezonanciafrekvenciájának és érzékenységének hőmérséklet- és nyomásfüggésének vizsgálata.
- Egy teljesen nyitott fotoakusztikus kamra tervezése, amelyen keresztül a mérendő gáz akadály nélkül átáramolhat, ezáltal a kamra nagyon gyors válaszidővel rendelkezik, miközben nyitottsága ellenére a kamra, egy zárt kamrához képest nem válik jelentős mértékben érzékenyebbé a környezeti zajokra, ezáltal a nyitott kamra alkalmas a zárt kamrával összemérhető pontosságú mérések végzésére.

Célul tűztem ki módszerek, eljárások kidolgozását, melyek segítségével egy fotoakusztikus rendszer működési paraméterei javíthatók, a fotoakusztikus rendszer működése megbízhatóbbá válik az alábbiak szerint:

- Egy olyan módszer kidolgozása, amelynek segítségével gyorsan és pontosan követhető a mérések során használt lézer hullámhosszának esetleges változása és a hullámhosszváltozás gyorsan és automatikus módon korrigálható.
- Egy olyan módszer kidolgozása, amelynek segítségével gyorsan és pontosan követhető egy fotoakusztikus kamra rezonanciafrekvenciájának változása.
- Módszer kifejlesztése, amelynek segítségével a fotoakusztikus rendszerben alkalmazott lézer modulációs paraméterei gyorsan változtathatók, optimalizálhatók a mért gáz nyomásának függvényében, a mérési pontosság növelésének céljából.
- Molekuláris relaxáció effektus fellépése esetén eljárás kidolgozása az effektus hatásának csökkentésére, illetve a mért jel kiértékelésére.
- Összetett gázelegyekben végzett fotoakusztikus mérések során fellépő spektrális interferencia kezelésére alkalmas mérési és számolási eljárások kidolgozása.
- Olyan esetekben, amikor a mérés megbízhatósága másként nem biztosítható, null-gáz (azaz a mérendő gázhoz hasonló összetételű, de a mérendő komponenst nem tartalmazó gáz) előállítására alkalmas eljárások és rendszer-egységek kifejlesztése, és a null-gáz használatával a fotoakusztikus mérések megbízhatóságának növelése.

- A fotoakusztikus rendszerekben az önellenőrző, önkorigáló eljárások gyakoriságának, sorrendiségének optimalizálása.

A fotoakusztikus módszer új kutatási és alkalmazási területeken történő alkalmazása az alábbiak szerint:

- Az atmoszféra vízgőztartalmát mérő, repülőgépre telepített fotoakusztikus rendszer fejlesztése, működésének optimalizálása.
- Polimer membránok, fóliák gázáteresztő-képességét mérő fotoakusztikus rendszer fejlesztése.
- Több-hullámhosszon működő, az aeroszokok hullámhossz-függő optikai abszorpciójának meghatározására alkalmas fotoakusztikus rendszer fejlesztése.

Végül célul tűztem ki a fotoakusztikus és az optikai abszorpciós módszer összehasonlítását, illetve olyan alkalmazások keresését, ahol a fotoakusztikus módszer versenyképes alternatívája az optikai abszorpciós elvű módszernek.

### III. ALKALMAZOTT MÓDSZEREK, ELRENDEZÉSEK

A munkám során legtöbbször alkalmazott fotoakusztikus rendszer egy vagy több longitudinális differenciális fotoakusztikus kamrából, egy vagy több telekommunikációs típusú, optikai szálba csatolt diódalézer fényforrásból és egy speciális integrált elektronikából áll. Az általam alkalmazott fotoakusztikus kamrákban, egy 40 mW fénytjeljesítményű lézer alkalmazásával, a legkisebb mérhető optikai abszorpciós együttható értéke  $2 \times 10^{-7} \text{ cm}^{-1}$ , ami az alkalmazott optikai abszorpciós vonal erősségétől függően ppm vagy ppm alatti koncentrációk kimutatását teszi lehetővé. Az általam alkalmazott elektronika alapja egy központi DSP (digital signal processing) egység, amely magas szinten programozható, jelentős memóriával rendelkezik, és így igen rugalmas működést tesz lehetővé. A DSP egység előállítja a fotoakusztikus jelkeltéshez szükséges lézer-modulációs jelalakot reprezentáló digitális jelet, amit egy digitális-analóg átalakító analóg jellé konvertál. Az analóg modulációs jellel gerjesztjük a fényforrást, amelynek fénye a fotoakusztikus kamrába jutva akusztikus hullámot kelt. A keletkező akusztikus hullámot a kamrához illesztett mikrofon (esetleg több mikrofon) detektálja, azaz elektromos jellé alakítja. Az elektromos jelet egy mikrofonerősítő erősíti, majd az erősített jel egy analóg-digitális átalakítón keresztül digitális jellé alakul. A digitális jel visszajut a DSP egységbe, ahol feldolgozásra kerül, azaz megfelelő módon

átlagolódik, majd az átlagolt jelből meghatározásra kerül egy olyan mennyiség, amely arányos a mérendő komponens koncentrációjával, amiből, szintén a DSP egységben, előzetesen meghatározott kalibrációs konstansok segítségével meghatározásra kerül a mérendő komponens koncentrációja. Végül az elektronika feladata a koncentráció kijelzése, tárolása, hibajelek és beavatkozó jelek generálása. Szintén az elektronika feladata az önellenőrző, önbeállító rutinok végrehajtása, a szükséges korrekciók elvégzése. Az elektronika alkalmas a szokásos négyszög és szinusz modulációs jelalak mellett speciális időbeli lefolyású gerjesztések előállítására is, és a rendszer alkalmas a gerjesztésre adott fotoakusztikus jel kiértékelésére. Szintén a fotoakusztikus rendszer része a megfelelő gázkezelés, amely segítségével a mintavételezés helyéről az analizálandó gázt a fotoakusztikus kamrába juttatjuk.

Az aeroszol mérések során fényforrásként egy Q-kapcsolt Nd:YAG lézert alkalmaztam.

#### IV. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

Újfajta fotoakusztikus kamrákat fejlesztettem ki, melyek segítségével a fotoakusztikus rendszerek kedvező tulajdonságait lehet továbbfejleszteni. Vizsgáltam e kamrák tulajdonságait.

1. Kifejlesztettem egy longitudinális, differenciális kamrakonstrukciót, amely alkalmas folyamatos gázáramlás mellett történő fotoakusztikus mérésekre, nagy érzékenységgel és rövid válaszidővel rendelkezik, és nagyfokú immunitást mutat a külső zajok által okozott túlvezérlésekkel szemben [1]. Megterveztem a longitudinális kamra egy magas hőmérsékleten működőképes változatát, amellyel lehetségessé vált pl. felületi szennyezőanyagok termodeszorpciós mintavételezésen alapuló mérése 220 °C kamrahőmérséklet mellett [2,3], illetve egy csökkentett válaszidejű változatát, amely alkalmas kis mennyiségű gázban, impulzusszerű koncentráció-változások mérésére, és amely sikeresen került alkalmazásra pl. prekoncentrációs mintavételezésen alapuló ammóniamérésekben [4,5].

2. Kísérleteim során elsőként bizonyítottam be, hogy a fotoakusztikus gázmérő rendszerek érzékenységének nyomásfüggése az elnyelési vonalalak, a fotoakusztikus kamrában található rezonátor félérték szélességének, valamint a mikrofon érzékenységének nyomásfüggéséből származik [6].

3. Elsőként egy újfajta, lényegében teljesen nyitott fotoakusztikus kamrát terveztem, amely a megfelelően kiválasztott akusztikus módusnak és a differenciális detektálásnak köszönhetően nagy mértékben érzéketlen a külső zajokkal szemben, és a korábbi fotoakusztikus rendszerekhez képest akár egy nagyságrenddel is rövidebb válaszütemű méréseket lehet végezni [7].

Új módszereket, eljárásokat dolgoztam ki, melyek segítségével egy fotoakusztikus rendszer működési paraméterei javíthatók, a fotoakusztikus rendszer működése megbízhatóbbá válik, és az általam javasolt módszerek előnyös tulajdonságait kísérletileg igazoltam.

4. Új módszert dolgoztam ki a lézer hullámhosszának gyors meghatározására, amely a lézerre adott fűrészfog-szerű gerjesztésén, egy keskeny abszorpciós vonal fotoakusztikus elvű mérésén és egy speciális kiértékelési eljárás alapján [8].

5. Új módszert dolgoztam ki a fotoakusztikus kamra rezonancia frekvenciájának gyors meghatározására, amely az ún. „chirp” gerjesztésén alapul [9].

6. Új módszert dolgoztam ki a változó gáznyomáson történő fotoakusztikus mérésekhez: a módszer alkalmazása során a gáznyomás folyamatos mérése és a diódalézer-áram modulációs paramétereinek az aktuálisan mért nyomáshoz való folyamatos optimalizálása történik. Igazoltam, hogy az általam javasolt módszer a fix modulációs áram alkalmazásával összehasonlítva a teljes mérési nyomástartományon javítja a fotoakusztikus rendszer érzékenységét [6].

7. Vizsgáltam a molekuláris relaxáció hatását a fotoakusztikus jelkeltésre. Elsőként állapítottam meg, hogy a szén-dioxid  $1,43\ \mu\text{m}$  hullámhosszon történő mérése során, amennyiben száraz nitrogén vivőgázban történik a mérés, a molekuláris relaxáció fellépésének köszönhetően a fotoakusztikus jel jelentősen lecsökken, szemben pl. a száraz argon vivőgázzal, amelyben a fenti hullámhosszon szén-dioxidot mérve nem lép fel a molekuláris relaxáció. Módszert javasoltam a relaxáció hatásának megszüntetésére, és így a mérés pontosságának növelésére, vízgőz kontrollált hozzáadásával. Megállapítottam, hogy a felnedvesített nitrogéngázban a fotoakusztikus jel fázisa alapján is meghatározható a szén-dioxid koncentráció [10].

8. Eljárásokat dolgoztam ki az összetett gázmintákban gyakran fellépő spektrális interferencia zavaró hatásának kiküszöbölésére. Többek között elsőként javasoltam egy eljárást, amely segítségével az ammónia  $1531,8\ \text{nm}$  hullámhosszon történő mérése során a környezeti levegőben található vízgőzmérést zavaró spektrális interferencia hatása kiküszöbölhető. A módszer lényege, hogy hullámhossz modulációt alkalmazva

és a fotoakusztikus spektrum két megfelelő pontján, ahol a fotoakusztikus jel fázisa egymáshoz képest ellentétes fázisú, mért jel különbségét képezve a levegőben található vízgőz zavaró hatása kiküszöbölhető [11].

9. Elsőként javasoltam a null-gáz (melynek összetétele lehetőség szerint minél inkább hasonlít a mérendő gáz összetételéhez, de a mérendő komponenst nem tartalmazza) generálásnak alkalmazását a kén-hidrogén, illetve az ózon fotoakusztikus mérése során. Bebizonyítottam, hogy null-gáz alkalmazásával e mérések pontossága, megbízhatósága jelentős mértékben megnövelhető [12,13].

A fotoakusztikus módszer új alkalmazási területeit dolgoztam ki

10. Elsőként alkalmaztam egy repülőgépre telepített fotoakusztikus vízgőzmérőt a légkör vízgőz és teljes víz tartalmának mérésére. A fotoakusztikus rendszer előnyös tulajdonságainak köszönhetően kiválóan alkalmasnak bizonyult e feladatra, ahol nagy pontosságú méréseket kell végezni, miközben a mérendő komponens koncentrációja széles tartományban és gyorsan változik [6,8,14,15].

11. Elsőként alkalmaztam a fotoakusztikus módszert polimer membránok gázáteresztő-képességének mérésére, ahol a mérés elején a membrán egyik oldalán található zárt térrészt (ún. forrás-oldal) elárasztjuk a mérendő komponenst magas koncentrációban tartalmazó gázzal, míg a minta másik oldalán lévő zárt térrész (ún. detektor-oldal) kezdetben nem tartalmazza a mérendő komponenst, és mérjük, hogy időben hogyan változik a mérendő komponens koncentrációja a detektor oldalon a mintán keresztül történő diffúzió eredményeként. A fotoakusztikus módszer alapvető előnye ebben az alkalmazásban a széles mérési tartomány, amely segítségével lényegében a teljes diffúziós folyamat végigkövethető [16].

12. Elsőként fejlesztettem Nd:YAG lézeren és frekvenciakonverzió alapuló több-hullámhosszon (1064, 532, 355 és 266 nm) működő fotoakusztikus aeroszol-mérőt. A létrehozott rendszer segítségével végzett mérések eredményei a széles mérési hullámhossz-tartománynak (amely magában foglalja a közeli infravöröst, a látható és az UV tartományt) köszönhetően egyedi információkat hordoznak a mért aeroszol fizikai és kémiai tulajdonságairól [17].

13. Szisztematikusan összehasonlítottam a fotoakusztikus és az optikai abszorpciós spektroszkópián alapuló gáزدetektálási módszereket, és megállapítottam, hogy egy megfelelően tervezett és működtetett fotoakusztikus rendszer számos tulajdonságában

felülmúlja, és így versenyképes alternatívája még egy nagyon gondosan optimalizált optikai abszorpció alapuló rendszereknek is. E tulajdonságok többek között a nagyobb mérési pontosság, a rövidebb válaszidő és a rendszer egyszerűsége [18].

## V. IRODALMI HIVATKOZÁSOK LISTÁJA

1. Z. Bozóki, A. Pogány and G. Szabó: Photoacoustic instruments for practical applications: present, potentials and future challenges. *Applied Spectroscopy Reviews*. **46** 1-37 (2011).
2. Y.-H. Pao (Ed.): *Optoacoustic Spectroscopy and Detection*. Academic Press, New York (1977).
3. F. J.M. Harren, G. Cotti, J. Oomens and S. te L. Hekkert: Photoacoustic Spectroscopy in Trace Gas Monitoring. in *Encyclopedia of Analytical Chemistry* R.A. Meyers (Ed.): 2203–2226 John Wiley & Sons Ltd, Chichester (2000).
4. P. L. Meyer, and M. W. Sigrist: Atmospheric pollution monitoring using CO<sub>2</sub>-laser photoacoustic spectroscopy and other techniques. *Review of Scientific Instruments*. **61** 779-1807 (1990).
5. S. Bernegger. and M. W. Sigrist,: CO-laser photoacoustic spectroscopy of gases and vapours for trace gas analysis. *Infrared Physics*. **30** 375-429 (1990).
6. A. Miklós, P. Hess and Z. Bozóki: Application of acoustic resonators in photoacoustic trace gas analysis and metrology. *Review of scientific instruments* **72** 1937-1955 (2001.)
7. H. Moosmüller, R.K. Chakrabarty and W.P. Arnott: Aerosol light absorption and its measurement: a review. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* **110** 844-878 (2009).
8. S. Schiltand L. Thevenaz: Wavelength modulation photoacoustic spectroscopy : theoretical description and experimental results. *Infrared Physics and Technology*. **48** 154-162 (2006).

## VI. AZ EREDMÉNYEK LEHETSÉGES HASZNOSÍTÁSA

Eredményeim gyakorlati hasznosítása jelenleg is zajlik a Szegedi Tudományegyetem, a Videoton Holding Zrt. és a Hilase Kft. közötti együttműködési szerződésben rögzítettek szerint. A Hilase Kft. által gyártott fotoakusztikus műszerek felhasználásra kerülnek Magyarországon és külföldön az iparban és a környezetvédelemben. Egy általunk kifejlesztett és repülőgépre telepített légköri vízgőzmérő-rendszer üzemel a CARIBIC projekt keretében; egy négy-hullámhosszú aeroszol-mérő a Karlsruhe-i Kutatóközpontban; továbbá számos



általunk kifejlesztett, a földgáz vízgőz- és/vagy kénhidrogén-tartalmát mérő műszer a MOL NyRt. gázüzemeiben (Üllés, Algyő, Sávoly, Barcs) illetve a százhalombattai Dunai Finomítóban, míg külföldön jelenleg egy északi-tengeri platformon, Spanyolországban és Skóciában működik ilyen rendszer, illetve számos további rendszer telepítése van folyamatban.

## VII. A TÉZISPONTOKHOZ KAPCSOLÓDÓ TUDOMÁNYOS KÖZLEMÉNYEIM

1. A. Miklós, P. Hess, **Z. Bozóki**: Application of Acoustic Resonators in Photoacoustic Trace Gas Analysis and Metrology. Rev. Sci. Instrum. **72**. 1937-1955 (2001).
2. H. Beck, **Z. Bozóki** and R. Niessner: Fast screening of Pentachlorophenol Contaminated Wood by Thermodesorption Sampling and Photoacoustic Detection. Analytical Chemistry **72** 2171-2176 (2000).
3. H. A. Beck, **Z. Bozóki** and R. Niessner: Surface Screening of Pentachlorophenol by Thermodesorption Sampling and Photoacoustic Detection. Analytical Sciences. **17**. s567-570. (2001).
4. A. Pogány, Á. Mohácsi, A. Varga, **Z. Bozóki**, Z. Galbács, L. Horváth and G. Szabó: A compact ammonia detector with sub-ppb accuracy using near-infrared photoacoustic spectroscopy and preconcentration sampling. Environmental Science and Technology **43** 826-830 (2009).
5. A. Pogány, Á. Mohácsi, S. K. Jones, E. Nemitz, A. Varga, **Z. Bozóki**, Z. Galbács, T. Weidinger, L. Horváth, G. Szabó: Evaluation of a diode laser based photoacoustic instrument combined with preconcentration sampling for measuring surface-atmosphere exchange of ammonia with the aerodynamic gradient method. Atmospheric Environment **44** 1490-1496 (2010).
6. M. Szakáll, H. Huszár, **Z. Bozóki** and G. Szabó: On the Pressure Dependent Sensitivity of a Photoacoustic Water Vapor Detector Using a Novel Modulation Method. Infrared Physics and Technology. **48**, 192-201 (2006)
7. **Z. Bozóki**, A. Szabó, Á. Mohácsi, G. Szabó: A fully opened photoacoustic resonator based system for fast response gas concentration measurements. Sensors and Actuators B. **147** 206-212 (2010).
8. M. Szakáll, **Z. Bozóki**, Á. Mohácsi, A. Varga and G. Szabó: Diode Laser Based Photoacoustic Water Vapor Detection System for Atmospheric Research. Applied Spectroscopy. **58**, 792-798 (2004).

9. M. Szakáll, A. Varga, A. Pogány, **Z. Bozóki** and G. Szabó: Novel resonance profiling and tracking method for photoacoustic measurements. *Applied Physics B*. **94** 691-698 (2009).
10. A. H. Veres, **Z. Bozóki**, Á. Mohácsi, M. Szakáll and G. Szabó: External cavity diode laser based photoacoustic detection of CO<sub>2</sub> at 1.43  $\mu\text{m}$ ; the effect of molecular relaxation. *Applied Spectroscopy*. **57**, 900-905 (2003).
11. H. Huszár, A. Pogány, **Z. Bozóki**, Á. Mohácsi, L. Horváth and G. Szabó: Ammonia monitoring at ppb level using photoacoustic spectroscopy for environmental application. *Sensors and Actuators B*. **134** 1027-1033 (2008).
12. A. Varga, **Z. Bozóki**, M. Szakáll and G. Szabó: Photoacoustic System for On-line Process Monitoring of Hydrogen Sulfide (H<sub>2</sub>S) Concentration in Natural Gas Streams. *Applied Physics B*. **85**, 315-321 (2006).
13. T. Ajtai, Á. Filep, A. Varga, G. Motika, **Z. Bozóki**, G. Szabó: Ozone concentration monitoring photoacoustic system based on a frequency quadrupled Nd:YAG laser. *Applied Physics B*. **101** 403–409 DOI 10.1007/s00340-010-4174-8 (2010).
14. **Z. Bozóki**, M. Szakáll, Á. Mohácsi, G. Szabó and Zs. Bor: Diode laser based photoacoustic humidity sensors. *Sensors and Actuators B*. **91**, 219-226 (2003).
15. M. Szakáll, J. Csikós, **Z. Bozóki** and G. Szabó: On the temperature dependent characteristics of a photoacoustic water vapor detector for airborne application. *Infrared Physics & Technology* **51** 113-121 (2007).
16. Z. Filus, T. Ajtai, Z. L. Horváth, **Z. Bozóki**, G. Pap, T. Nagy, T. Katona, G. Szabó: A novel apparatus based on a photoacoustic gas detection system for measuring permeation parameters of polymer samples. *Polymer Testing* **26** 606–613 (2007).
17. T. Ajtai, Á. Filep, M. Schnaiter, C. Linke, M. Vragel, **Z. Bozóki**, G. Szabó, T. Leisner: A novel multi-wavelength photoacoustic spectrometer for the measurement of the UV–vis-NIR spectral absorption coefficient of atmospheric aerosols. *Journal of Aerosol Science* **41** 1020–1029 (2010)
18. **Z. Bozóki**, Á. Mohácsi, G. Szabó, Z. Bor, M. Erdélyi, W. Chen, F. K. Tittel, Near infrared diode laser based spectroscopic detection of ammonia: a comparative study of photoacoustic and direct optical absorption methods. *Applied Spectroscopy* **56** 715-719 (2002).